Différentes approches de modélisation des écoulements et du transport dans un réseau de tubes – Comparaison avec des résultats expérimentaux

S. Lanini (BRGM)
R. Fabriol (BRGM)

Mai 2000

GISOS
Ecole des Mines
Parc Saurupt 54042 Nancy Cedex
tél : 03 83 58 42 81 / fax : 03 83 57 97 94
email : gisos@mines.u-nancy.fr
http://www.mines.u-nancy.fr/gisos

Rapport BRGM/RP-50154-FR

Différentes approches de modélisation des écoulements et du transport dans un réseau de tubes – Comparaison avec des résultats expérimentaux

Mai 2000

BRGM/RP-50154-FR

BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Mots clés : Modélisation, Dispersion, Traceur, Réseau de tubes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Lanini S., Fabriol R. (2000) - Différentes approches de modélisation des écoulements et du transport dans un réseau de tubes ; comparaison avec des résultats expérimentaux. Rapport GISOS/RP-50154-FR. 48 pages, 10 figures, 1 tableau, 3 annexes.

© BRGM, 2000. Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Un des objectifs de l'axe 2 du GISOS (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains) est la mise au point de modèles afin de prévoir l'impact des travaux miniers sur l'eau. Dans la présente étude plusieurs modèles ont été testés afin d'en évaluer l'aptitude à simuler l'écoulement et le transport dans un réseau de galeries.

Dans un premier temps pour permettre la validation et la comparaison, ces modèles ont été confrontés à des résultats expérimentaux de propagation d'un traceur dans un micromodèle en laboratoire.

Plusieurs approches de modélisation (milieu poreux équivalent, double porosité, réseau de fractures) ont été mises en œuvre en utilisant le code de calcul hydrogéologique aux éléments finis TAFFETAS (BRGM). Une approche plus conceptuelle, un réseau de tubes, a été spécifiquement développée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Dans chaque cas, les résultats obtenus sont présentés et commentés.

Ce test a également permis de montrer que les modèles fondés sur une approche discrète (réseau de fracture ou modèle conceptuel) semblaient plus adaptés pour une future modélisation à grande échelle.

Sommaire

SYNTHÈSE 3
SOMMAIRE 5
LISTE DES FIGURES 6
LISTE DES TABLEAUX 6
INTRODUCTION 7
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : DIFFÉRENTES APPROCHES DE MODÉLISATION 9
1.1 Titre Applications 9
1.2 Approche continue 9
1.3 Approche discrète 10
1.3.1 Caractérisation des réseaux de fractures 10
1.3.2 Hydrodynamique et transport 10
1.4 Autres approches 13
1.5 Conclusion 13
2. EXPÉRIMENTATION DE RÉFÉRENCE 15
2.1 Description du micromodèle 15
2.2 Conditions expérimentales 16
2.3 Résultats expérimentaux 18
2.4 Contraintes de modélisation 18
3. MILIEU POREUX EQUIVALENT 21
3.1 Paramètre physiques et hydrodynamiques 21
3.2 Paramètres numériques 22
3.3 Résultats 23
4. MILIEU À DOUBLE POROSITÉ 25
4.1 Paramètres physiques et hydrodynamiques 25
4.2 Paramètres numériques 26
4.3 Résultats 27
5. RÉSEAU DE FRACTURES 29
5.1 Paramètres physiques et hydrodynamiques 29
5.2 Paramètres numériques 30
5.3 Résultats 31
6. APPROCHE CONCEPTUELLE 33
6.1 Présentation du modele d'écoulement et de transport 33
6.2 Géométrie du réseau de tubes 36
6.3 Modèle n°1 : répartition empirique des débits aux nœuds 37
6.3.1 Paramètres physiques et hydrodynamiques 37
6.3.2 Paramètres numériques 37
6.3.3 Résultats 38
6.4 Modèle n°2 : calcul du champ de pression 40
6.4.1 Paramètres physiques et hydrodynamiques 42
6.4.2 Paramètres numériques 42
6.4.3 Résultats 42

6.5 Conclusions et perspectives sur le modèle conceptuel de réseau de tubes 43
CONCLUSION 45
BIBLIOGRAPHIE 47

Liste des annexes

Annexe 1 : Résultats numériques

Annexe 2 : Dimensionnement du réseau conceptuel

Annexe 3 : Estimation du régime d'écoulement dans un réseau de galeries d'exploitation minière.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma du micromodèle 15

Figure 2 : Motif de base du réseau gravé 16

Figure 3 : Maillage du milieu poreux équivalent 22

Figure 4 : Maillage du milieu à double porosité 27

Figure 5 : Maillage du réseau de fractures 30

Figure 6 : Principe du modèle de transport 33

Figure 7 : Principe de la dispersion de Taylor 34

Figure 8 : Schéma du réseau de tubes 36

Figure 9 : Schéma d'un petit réseau divergent 39

Figure 10 : Schéma d'ensemble d'un motif de base du réseau 41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres expérimentaux 17

Introduction

L'axe 2 du GISOS concerne l'impact des ouvrages souterrains sur l'eau. Dans un premier temps, la priorité définie au sein de cette thématique est la prévision de l'impact sur l'eau de l'abandon des mines de fer en Lorraine.

Il s'agit en particulier d'étudier le phénomène de pollution par le sulfate, consécutif à l'arrêt de l'exhaure au moment de l'abandon des mines. L'arrêt des pompages a pour conséquence un ennoyage progressif des galeries, puisque les précipitations continuent naturellement à s'infiltrer à travers la couche supérieure (calcaire du Dogger).

Le réseau de galeries souterraines constitue alors un réservoir, siège d'écoulements et de réactions géochimiques complexes. L'existence de cette unité hydro-géochimique agit forcément sur le système hydrologique situé à l'aval. Ainsi, aux points de débordement des deux bassins sud et centre déjà ennoyés, une concentration importante en sulfate (de l'ordre de 1.6 g/l) est mesurée dans l'eau.

L'objectif final de cette étude est donc de développer un modèle numérique prenant en compte les transferts couplés hydrodynamique-transport-chimie utilisable comme aide à la gestion de la ressource en eau en région minière.

Le système à étudier se distingue des milieux naturels "classiques" par sa géométrie. Le réseau de galeries d'exploitation est développé principalement dans trois couches superposées, légèrement inclinées, et connectées en différents points. La topologie et les dimensions de ces réseaux sont des données accessibles. En revanche, la géométrie des quelques zones dépilées, ainsi que certaines limites latérales des bassins sont moins bien définies.

L'ensemble constitue un véritable réseau maillé souterrain multicouche. Il repose sur une couche de marnes imperméables.

Compte-tenu de cette géométrie particulière, une grande partie des conduites d'écoulement sont en charge. Or, les codes hydrogéologiques courants ne sont pas spécifiquement développés pour traiter de telles configurations hydrauliques.

La première tâche de l'étude a donc consisté à vérifier la pertinence et la robustesse de différents modèles d'écoulements et de transports. Pour cela, on a choisi de les appliquer à un cas relativement académique de dispersion d'un traceur dans un réseau de conduites (sans réaction chimique).

Cependant, nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'expérimentations à échelle réelle suffisamment documentée pour valider des tests de comparaisons de codes. Les modèles numériques ont finalement été mis en œuvre pour simuler la propagation d'un échelon de traceur dans un micromodèle gravé (quelques centimètres carrés), l'expérience correspondante étant parfaitement décrite par Corapcioglu et al. (1997).

Les observations portent sur l'écoulement en charge et le transport d'un traceur dans un système présentant une forte analogie géométrique avec les réseaux de galeries minières. Un autre point commun entre les systèmes est que dans les deux cas les écoulements sont laminaires (voir annexe 3 pour l'estimation du régime d'écoulement dans des galeries d'exploitation minière).

Mais il ne faut en aucun cas considérer le micromodèle comme une similitude (changement d'échelle) ou un modèle réduit. Les résultats présentés dans ce rapport ne pourront donc pas être extrapolés au cas réel. Ils ne sont qu'un support aux tests de comparaison des différentes approches de modélisation.

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre de l'axe 2 du GISOS en 1999. Il comprend une première partie bibliographique dans laquelle différentes approches de modélisation du transport dans un réseau de fractures sont passées en revue. Le deuxième chapitre regroupe une description détaillée de l'expérimentation servant de référence aux simulations et les hypothèses de modélisation. Les parties suivantes sont consacrées aux différentes approches et méthodes mises en œuvre pour modéliser la dispersion d'un traceur dans un micromodèle. Dans chaque cas, les avantages, inconvénients et éventuelles limitations de la méthode utilisée sont indiqués.

1. Etude bibliographique : différentes approches de modélisation

1.1 TITRE APPLICATIONS

La recherche bibliographique a porté sur les méthodes de modélisation des écoulements et du transport de soluté dans les milieux poreux, les milieux fracturés ou les réseaux de fractures.

Le développement de modèles d'écoulements et de transport de soluté dans les milieux fracturés est motivé par un grand nombre d'applications.

Ainsi, les thématiques abordées par les équipes qui travaillent sur ce sujet vont des aquifères karstiques (Siemers & Dreybrodt, 1998 ; Bauer et al., 1999) aux horizons gypseux (Birk et al., 1999) ou socles granitiques (Moreno & Neretnieks, 1993) en passant par les galeries de mines (Adams & Younger, 1999).

La littérature spécifique relative au cas des réseaux sanitaires de distribution ou collecte d'eau a été délibérément écartée de cette revue (écoulements turbulents, dispositifs de régulation...).

1.2 APPROCHE CONTINUE

La modélisation continue la plus "simple" est celle du milieu poreux équivalent. Elle repose sur l'existence d'un volume élémentaire représentatif (V.E.R.), à l'intérieur duquel les différentes variables sont moyennées. Le milieu peut ainsi être décrit par des propriétés hydrogéologiques macroscopiques.

En s'appuyant sur une étude théorique et statistique, Long et al. (1982) ont défini les critères qu'une formation rocheuse doit vérifier pour pouvoir être décrite par un modèle de milieu poreux équivalent. Ils portent entre autres sur la densité, la taille et l'orientation des fractures.

En pratique, cette technique ne s'avère applicable de manière satisfaisante que dans peu de cas réels.

Pour se rapprocher de la réalité et expliquer certaines observations expérimentales (notamment en génie pétrolier), la notion de milieu à double porosité est ensuite apparue (Warren & Root, 1963).

La formation rocheuse est composée d'une matrice poreuse (capacité de stockage) très peu perméable, entrecoupée de fractures à grande conductivité hydraulique. La modélisation déterministe basée sur ce concept traite les deux milieux de porosité différente comme deux milieux poreux continus, reliés par la continuité des pressions à leurs interfaces.

1.3 APPROCHE DISCRÈTE

La modélisation des milieux fracturés abordés selon un point de vue discret, implique de calculer l'écoulement et le transport individuellement dans chaque conduit pris en compte.

Les approches discrètes peuvent se regrouper en différentes catégories selon le principe adopté d'une part pour définir le réseau de fractures, et d'autre part pour décrire mathématiquement les écoulements et le transport de soluté.

1.3.1 Caractérisation des réseaux de fractures

Dans la plupart des cas, les conduits sont définis par des propriétés stochastiques (distribution, densité, taille, orientation...). Un grand nombre de simulations est réalisé et les résultats sont analysés par une méthode de type Monte-Carlo (Schwartz et al., 1983 ; Bauer et al., 1999 ; Gylling et al., 1999).

Les modèles de percolation reposent sur une technique très différente (Siemers & Dreybrodt, 1998). Elle consiste à définir un réseau régulier de nœuds reliés par des tubes (2D ou 3D) sur lesquels une loi de probabilité d'existence d'une fracture est appliquée. Il faut ensuite identifier les séries de tubes qui permettent de relier l'entrée et la sortie du réseau, puis calculer l'écoulement le long des chemins ainsi définis.

1.3.2 Hydrodynamique et transport

La plupart des modèles discrets ne considèrent l'écoulement que dans le réseau de fractures (la matrice n'est pas prise en compte). Ils incluent un terme puits/source dans l'équation de transport de soluté pour représenter les phénomènes d'adsorption sur les parois ou de diffusion vers la matrice (ex : Moreno & Neretnieks, 1993).

Cependant, pour prendre en compte les échanges entre la matrice et le réseau de fractures, l'équipe de l'Institut Géologique de Tübingen (Bauer et al., 1999 ; Birk et al., 1999), a développé un modèle mixte : la matrice est un milieu poreux équivalent et les fractures sont représentées par un réseau de tubes. Les échanges entre les deux systèmes sont proportionnels à leur différence de pression.

Dans tous les cas, les modèles discrets supposent que l'hydrodynamique est stationnaire et unidirectionnelle. Les écoulements dans les fractures sont donc décrits par des lois hydrauliques classiques qui expriment la relation entre la différence de pression entre l'entrée et la sortie du tube (perte de charge) et le débit qui le traverse.

On pourra par exemple consulter Sellens (1996) pour compléter les informations suivantes.

L'équation de Darcy-Weisbach est la formulation la plus générale puisqu'elle s'applique à la fois pour les écoulements laminaires et turbulents et quelque soit la géométrie de la section du tube :

$$\Delta H = f.\frac{L}{D}.\frac{V^2}{2.g} \qquad \text{ou} \qquad \Delta P = f.\frac{\rho.L}{2.D.S^2}.Q^2$$

avec :

H la charge (m)

P la pression (Pa)

L la longueur du tube (m)

D le diamètre du tube (m)

S la section du tube (m^2)

g l'accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)

V la vitesse de l'écoulement ($m.s^{-1}$)

Q le débit dans le tube ($m^3.s^{-1}$)

f le coefficient de friction

En régime turbulent, différentes formules semi-empiriques (équations de Blasius, de Colebrook, de Nikuradse ou encore abaques de Moody) permettent de calculer f en fonction du nombre de Reynolds ($Re = \frac{V.D}{\upsilon}$, avec ν la viscosité cinématique du fluide), de la section du tube et de sa rugosité relative.

En régime laminaire (Re<2500), on a : $f = \frac{64}{Re}$. La relation perte de charge-débit n'est pas quadratique mais linéaire.

En particulier, si le tube a une section circulaire (écoulement de Poiseuille), on a :

$$V = \frac{D^2}{32.\mu}.\frac{\Delta P}{L}. \qquad \text{ou} \qquad Q = \frac{\pi.D^4}{128.\mu}.\frac{\Delta P}{L}$$

$K = \frac{\pi}{128.\mu}.\frac{D^4}{L}$ est la conductance du tube (en $m^4.s.kg^{-1}$).

Les fractures connectées les unes aux autres constituent un réseau maillé, dont chaque intersection est appelée un nœud. Pour calculer le débit en tout point du réseau, il faut ajouter aux lois d'écoulement dans les tubes, la loi de conservation de la masse.

En chaque nœud i, elle s'exprime de façon analogue à la loi de Kirchhoff pour un réseau électrique : $\sum_j Q_{ji} = 0$ avec Q_{ji} le débit (algébrique) qui traverse le tube reliant les nœuds j et i.

Dans les modèles discrets de transport en milieu fracturé, l'évolution de la concentration des solutés dans les tubes est souvent décrite par l'équation d'advection-dispersion 1D. La méthode de suivi de particules est aussi utilisée (Moreno & Neretnieks, 1993). L'équation de conservation aux nœuds traduit dans la plupart des cas un mélange parfait. Ainsi, avec C_i la concentration de mélange au nœud i et C_{ji} celle à la sortie i du tube liant les nœuds i et j, on écrit :

$$C_i = \frac{\sum_j C_{ji}.|Q_{ji}|}{\sum_j |Q_{ji}|}$$

1.4 AUTRES APPROCHES

Il existe d'autres techniques de modélisation ayant déjà été appliquées à la modélisation du transport de polluant en milieu poreux naturel.

On peut en particulier citer la méthode de gaz sur réseau (Stockman et al., 1997?) ou celle des réseaux neuronaux artificiels (Morshed & Kaluarachchi, 1998).

Les articles consultés présentent des résultats encourageants. L'étude bibliographique doit cependant être approfondie pour savoir si ces techniques sont appliquées (ou applicables) au cas de milieux fracturés.

1.5 CONCLUSION

Le recensement (non exhaustif) des techniques de modélisation qui a été présenté a pour objectif, outre son intérêt pédagogique, de choisir les modèles à tester pour simuler la dispersion d'un traceur dans un micromodèle.

Compte-tenu de la régularité du réseau gravé, il a été décidé de tester l'approche continue. Pour cela, le code aux éléments finis TAFFETAS développé par le BRGM (Fillion et al., 1997) a été utilisé une première fois en définissant le micromodèle comme un milieu poreux équivalent, et une seconde fois comme un milieu à double porosité (avec ou sans échanges matrice-fractures).

Les méthodes reposant sur une approche discrète du réseau de fractures ont été écartées car elles utilisent une caractérisation stochastique du réseau. Or dans le cas qui nous intéresse, la géométrie interne du micromodèle est parfaitement connue. Cette information ne doit donc pas être perdue.

On a alors développé un modèle discret conceptuel, dans lequel les écoulements sont décrits classiquement et le transport de manière semi-empirique. Ce modèle de réseau de tubes a été développé au BRGM à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

2. Expérimentation de référence

Corapcioglu et al. (1997) décrivent une expérience d'injection d'un traceur (teinture) dans un micromodèle gravé.

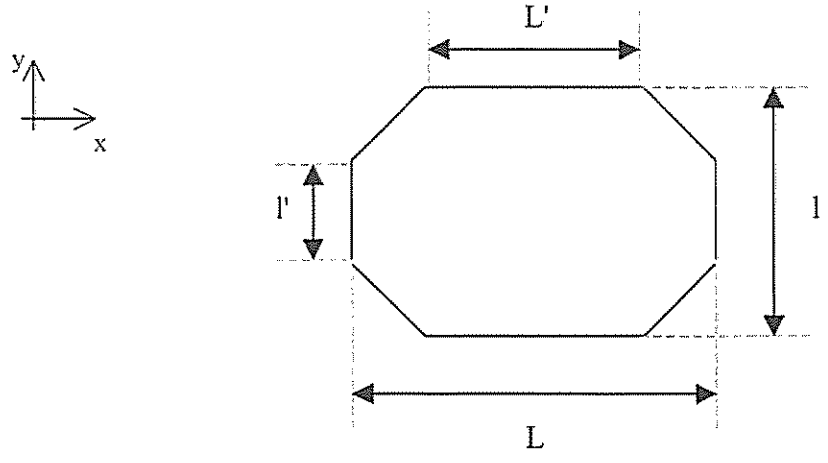
Les résultats expérimentaux ne sont pas fournis sous forme numérique, mais on dispose de courbes de passage (BTC pour Breakthrough Curves) en trois points répartis le long de l'axe central du système (x=10, 32 et 54 mm). Des cartographies 2D des isovaleurs mesurées de concentration à différents temps sont également reproduites.

De plus, les paramètres expérimentaux et les propriétés hydrodynamiques du micromodèle et du traceur sont estimés et analysés.

Tous les éléments nécessaires pour mettre en œuvre une modélisation numérique de cette expérience sont donc disponibles.

2.1 DESCRIPTION DU MICROMODÈLE

Le micromodèle est une forme géométrique plane, dont la hauteur, comprise entre 0.075 mm (canaux) et 0.2 mm (pores), est très petite au regard de ses autres dimensions.



L = 64 mm l = 40 mm L' = 42 mm l' = 18 mm

Figure 1 : Schéma du micromodèle

Le réseau gravé se compose de tubes perpendiculaires orientés à 45° par rapport à la direction principale de l'écoulement (horizontale).

A espacement régulier, des pores en forme de diamant sont disposés à l'intersection des tubes (figure 2).

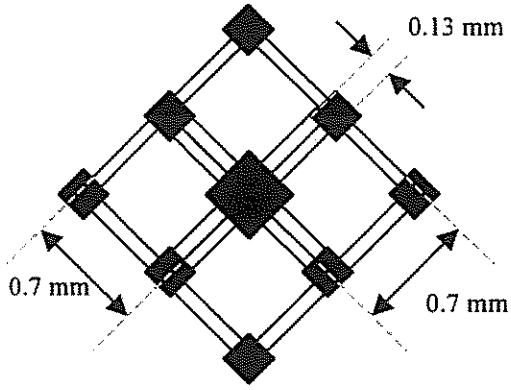


Figure 2 : Motif de base du réseau gravé

2.2 CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Le micromodèle est placé horizontalement sur un plan de travail. On injecte de l'eau distillée avec un débit constant à l'une des extrémités du système. Puis, lorsque l'écoulement est parfaitement établi, on introduit un traceur dans l'eau à l'aide d'une pompe à seringue. Un dispositif vidéo filme le réseau au cours de l'expérience. L'évolution de la concentration en traceur en tout point est ensuite déterminée par traitement d'image.

Les paramètres hydrodynamiques et de transport sont les suivants :

Paramètres mesurés	Paramètres estimés ou calculés
Volume de vide $V_{vide} = 0.13\ cm^3 = 1.3.10^{-7}\ m^3$	
Porosité $\varepsilon = 0.28$	Volume total $Vt = V_{vide} / \varepsilon = 4.64.10^{-7}\ m^3$
	Hauteur moyenne $H = Vt/(L*l) \Rightarrow H = 181.25.10^{-6}\ m$
	Section d'entrée $Se = l'*H = 3.2625.10^{-6}\ m^2$
Débit d'injection $Q = 2\ ml/h = 5.55.10^{-10}\ m^3/s$	Vitesse dans les pores - à l'entrée : u = 2 mm/s - au centre : u = 0.25 mm/s
Diamètre moyen des "grains" : $d=0.57\ mm=0.57.10^{-3}\ m$	Nombre de Reynolds (au centre) $Re = u.d/\nu = 0.1425$ ($\nu_{eau}=1.10^{-6}\ m^2/s$)
Coefficient de diffusion moléculaire $D = 5.10^{-4}\ mm^2/s = 5.10^{-10}\ m^2/s$	Nombre de Peclet (au centre) $Pe = u.d/D = 285$
Conductivité hydraulique $K_{xx} = 0.2\ mm/s = 2.10^{-4}\ m/s$	Dispersivité longitudinale $\alpha_L.u = f(Pe) \Rightarrow \alpha_L = 0.5\ mm = 5.10^{-4}\ m$
	Dispersivité transversale $\alpha_T = 0.5.\alpha_L \Rightarrow \alpha_T = 0.25\ mm = 2.5.10^{-4}\ m$

Tableau 1 : Paramètres expérimentaux

2.3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le micromodèle est progressivement envahi par le traceur qui atteint l'autre extrémité après 163s.

Les observations expérimentales mettent en évidence une dispersion mécanique, liée à la géométrie du réseau. La dispersivité est liée à l'échelle, et varie en fonction de la distance au point d'injection, comme le montrent les 3 BTC qui ont des pentes légèrement différentes.

On trouvera en annexe 1 une reproduction de la cartographie 2D des isoconcentrations observées à t=38s, t=81s, t=122s et t=163s. Les BTC expérimentales sont quant à elles incorporées pour référence dans les graphiques présentant les résultats de simulations (voir annexe 1).

2.4 CONTRAINTES DE MODÉLISATION

Pour simuler les comportement du traceur injecté dans le micromodèle, il faut respecter certaines similitudes hydrodynamiques afin d'obtenir des résultats satisfaisants.

Les critères suivants ont donc été appliqués pour toutes les méthodes mises en œuvre :

- Même porosité totale : $\varepsilon_{\text{modèle}} = \varepsilon_{\text{expérimental}}$

Selon le modèle utilisé, ce critère permet de fixer la porosité ou les dimensions des fractures ou des tubes.

- Même nombre de Reynolds (évalué au centre du micromodèle) pour les écoulements modélisés et expérimentaux

Le débit d'injection du fluide dans le modèle est donc calculé pour que la vitesse d'écoulement dans les pores/tubes/fractures soit identique à celle estimée dans le micromodèle. Dans beaucoup de cas, ce critère équivaut à $\mathbf{u}_{\text{modèle}} = \mathbf{u}_{\text{exp}}$.

- Similitude sur les échelles de longueur (facultative)

Cette technique peut permettre de réduire le maillage ou le temps de calcul. Il faut cependant noter que si on impose des vitesses expérimentales et numériques identiques, une similitude sur l'échelle de longueur implique la même similitude sur l'échelle temporelle.

A ces contraintes physiques peuvent s'ajouter dans certains cas des contraintes numériques. Ainsi, lorsque la résolution du problème modélisé fait intervenir des discrétisations spatiales ou temporelles, les pas de temps et d'espace doivent être fixés pour respecter les critères de convergence classiques :

$$Pe_G = \frac{\Delta x}{\alpha_L} < 2 \qquad \text{(Peclet de grille)}$$

$$Co = \frac{u.\Delta t}{\Delta x} < 1 \qquad \text{(critère de Courant)}$$

$$Fo = \frac{u.\alpha_L.\Delta t}{\Delta x^2} < 1 \qquad \text{(critère de Fourier)}$$

3. Milieu Poreux Equivalent

La première approche continue de modélisation à avoir été testée est la plus simple, puisqu'elle consiste à assimiler le micromodèle gravé à un milieu poreux équivalent.

A priori, elle peut être mise en œuvre avec n'importe quel code de calcul hydrogéologique à condition qu'il résolve les équations de transport, et qu'il puisse prendre en compte la géométrie externe octogonale du système. En l'occurrence, c'est le code aux éléments finis TAFFETAS, développé au BRGM, qui a été utilisé.

3.1 PARAMÈTRE PHYSIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

- Géométrie externe : longueur 64 mm, largeur maximale 40 mm
- Dispersivité longitudinale : $\alpha_L = 0.5$ mm
- Dispersivité transversale : $\alpha_T = 0.25$ mm
- Conductivité hydraulique : $K_x = K_y = 0.1414$ mm/s
- Coefficient de diffusion moléculaire : $D_d = 5.10^{-10}$ m^2/s

- **Porosité = 0.28**

- Régime hydrodynamique permanent :
  - $\Delta H = 0.05$ m => U=0.0847 mm/s (centre) => **u = 0.3 mm/s**
    U=0.167 mm/s (entrée) => u = 0.6 mm/s

  - Nombres adimensionnels (au centre, avec $\nu=1.10^{-6}$ m^2/s et $d=0.57.10^{-3}$ m) :

    $Re = u.d/\nu = 0.171$ et $Pe = u.d/D_d = 342$

3.2 PARAMÈTRES NUMÉRIQUES

- Code de calcul aux éléments finis (TAFFETAS)
- Maillage : 4961 nœuds, 4800 éléments (voir figure 3)

  Δx de l'ordre de 0.25 mm dans les zones d'entrées et sortie, 0.8 mm ailleurs
- Pas de temps : $\Delta t = 1$ s
- Nombres adimensionnels (évalués au centre) : Peclet de grille : 1.6

  Courant : 0.375

  Fourier : 0.23
- Temps de calcul (PC, Pentium II, 166 MHz) : 20 min (pour une période de 240 s)

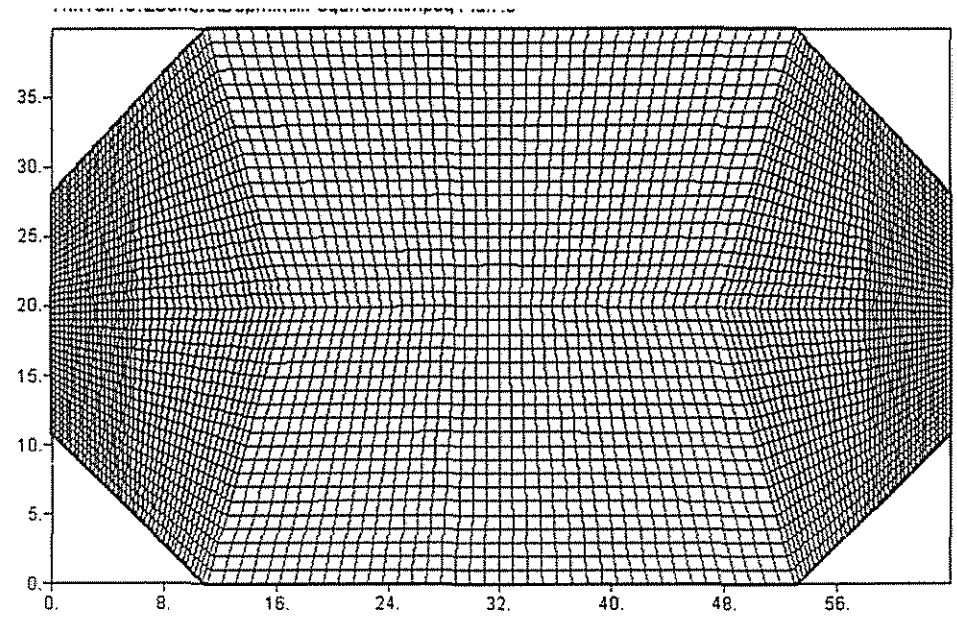


Figure 3 : Maillage du milieu poreux équivalent

3.3 RÉSULTATS

Les BTC et la cartographie 2D des concentrations calculées à différents temps sont présentées en annexe 1. Les isovaleurs ont été obtenues par interpolation linéaire (à l'aide du logiciel Surfer) des valeurs calculées par TAFFETAS aux 4961 nœuds du maillage.

Globalement, la propagation du traceur dans le milieu poreux est en accord avec les observations expérimentales. Cependant, la largeur du front calculée (dispersivité) est plus importante que celle mesurée.

Le système modélisé est relativement simple, régulier et homogène. De plus, les conditions imposées aux limites sont constantes. Dans ce contexte, il n'est pas surprenant que le modèle de milieu poreux équivalent donne des résultats satisfaisants. En revanche, l'utilisation de cette approche continue ne paraît pas adaptée pour traiter un cas complexe comme les écoulements en exploitation minière, car elle serait confrontée à un délicat problème d'échelle (quelle taille pour le V.E.R ?) et de valeurs des propriétés macroscopiques (perméabilité, dispersivité...).

4. Milieu à Double Porosité

La modélisation de milieu à double porosité peut être mise en œuvre avec de nombreux codes de calcul hydrogéologiques. Ceux-ci doivent cependant être suffisamment robustes pour pouvoir traiter d'éventuels contrastes importants entre les propriétés hydrodynamiques des différents matériaux composant le système.

L'étude présentée dans ce chapitre a été réalisée à l'aide du code aux éléments finis TAFFETAS.

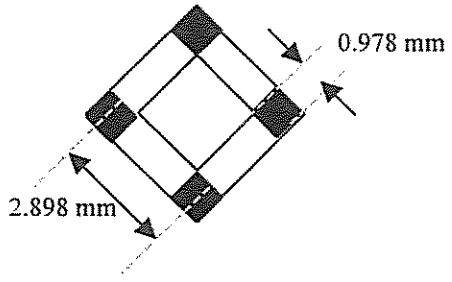
Les fractures sont définies comme des parallélépipèdes dans lesquels le matériau a des propriétés différentes de celui de la matrice. Deux jeux de fractures identiques et parallèles, inclinées de 45° (resp. 135°) par rapport à la direction principale de l'écoulement sont définis. Le nombre de fractures correspond à la densité la plus élevée possible qui permette la génération automatique d'un maillage (mailleur Delaunay, mailles triangulaires) avec un nombre raisonnable de nœuds.

La porosité du matériau composant les fractures est calculée de façon à ce que la porosité totale dans le modèle soit identique à celle du micromodèle expérimental.

Les dispersivités sont déterminées pour que les critères de convergence numériques soient respectés.

4.1 PARAMÈTRES PHYSIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

- Géométrie : longueur 64 mm, largeur maximale 40 mm
- Fractures : Largeur = 0.978 mm ; espacement = 2.898 mm



Porosité = 0.5 (= coefficient d'emmagasinement)

Dispersivité : α_L = 0.8 mm et α_T = 0.4 mm

Conductivité hydraulique : K_x= K_y= 0.4 mm/s (K_{xy}=0)

- Matrice : Porosité = 0.01 (= coefficient d'emmagasinement)

  Dispersivité : $\alpha_L = \alpha_T = 8$ mm

  Conductivité hydraulique : $K_x = K_y = 1.10^{-7}$ mm/s ($K_{xy}=0$)

- Coefficient de diffusion moléculaire : $D_d = 5.10^{-10}$ m^2/s

- **Porosité totale= 0.28**

- Régime hydrodynamique permanent :

  - $\Delta H = 0.05$ m => U=0.152 mm/s (centre) => **u = 0.3 mm/s**

  - Nombres adimensionnels (évalués au centre avec $\nu = 1.10^{-6}$ m^2/s et d = 0.489 mm) : **$Re = u.d/\nu = 0.14$ et $Pe = u.d/D_d = 293.4$**

4.2 PARAMÈTRES NUMÉRIQUES

- Code de calcul aux éléments finis (TAFFETAS)

- Maillage : 11505 nœuds, 11298 éléments (voir figure 4)

  $\Delta x=\Delta y=0.69$ mm dans les fractures et 1.36 mm dans la matrice

- Pas de temps : $\Delta t = 1$ s

- Nombres adimensionnels (évalués au centre) : Peclet de grille : 0.86

  Courant : 0.43

  Fourier : 0.5

- Temps de calcul (PC, Pentium II, 166 MHz) : 1h20 min (pour une période de 240 s)

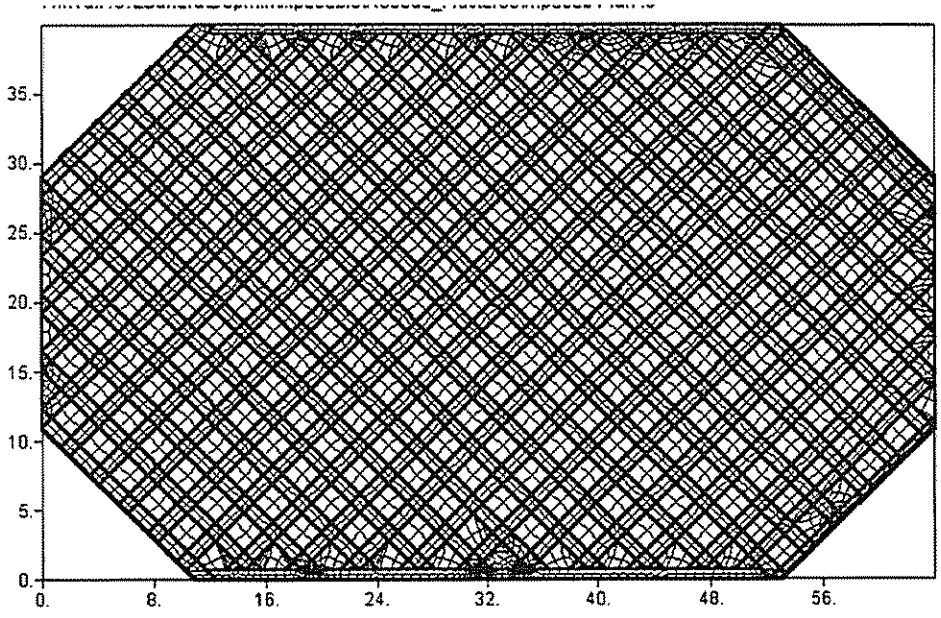


Figure 4 : Maillage du milieu à double porosité

4.3 RÉSULTATS

Les BTC et la cartographie 2D des concentrations calculées à différents temps sont présentées en annexe 1.

Les isovaleurs ont été obtenues par interpolation linéaire des valeurs calculées par TAFFETAS aux 115005 nœuds du maillage (dans les fractures et dans la matrice).

Les isocontours apparaissant entre les fractures doivent être ignorés car ils ne correspondent pas aux résultats mais à des artefacts liés à la technique de lissage et visualisation des données.

Les résultats sont très proches de ceux obtenus avec le modèle de milieu poreux équivalent.

La technique utilisée nécessite une discrétisation spatiale fine car l'ensemble du système est maillé, y compris la matrice qui ne participe pourtant pas significativement aux écoulements. Ceci induit des temps de calculs importants qui peuvent être prohibitifs pour envisager d'appliquer cette méthode de modélisation sur un système plus complexe.

5. Réseau de fractures

Cette approche diffère de la précédente par le fait qu'elle ne considère que le réseau de fractures. Ainsi, la topologie du système à discrétiser est un polygone ramifié au sein duquel sont régulièrement répartis des trous. Ceux-ci correspondent naturellement à la matrice et ne seront pas maillés. Il n'y a aucun échange possible aux interfaces fractures-blocs poreux. Le réseau de fractures constitue quant à lui un continuum poreux.

A priori, le réseau de fractures peut être modélisé à l'aide de tous codes aux éléments finis capables d'assimiler la géométrie complexe du système.

L'étude présentée ici a été réalisée à l'aide du code TAFFETAS. Le réseau de fractures et les paramètres hydrodynamiques sont identiques à ceux utilisés pour le milieu à double porosité.

5.1 PARAMÈTRES PHYSIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

- Géométrie : longueur 64 mm, largeur maximale 40 mm
- Fractures : Largeur = 0.978 mm ; espacement = 2.898 mm

  Porosité = 0.5 (= coefficient d'emmagasinement)

  Dispersivité : α_L = 0.8 mm et α_T = 0.4 mm

  Conductivité hydraulique : $K_x = K_y = 0.4$ mm/s ($K_{xy}=0$)
- Coefficient de diffusion moléculaire : $D_d = 5.10^{-10}$ m^2/s
- **Porosité totale= 0.28**
- Régime hydrodynamique permanent :
  - ΔH = 0.05 m => U=0.154 mm/s (centre) => **u = 0.3 mm/s**
  - Nombres adimensionnels (évalués au centre avec $\nu = 1.10^{-6}$ m^2/s et d = 0.489 mm) : **Re = u.d/ν = 0.14 et Pe = u.d/D_d = 293.4**

5.2 PARAMÈTRES NUMÉRIQUES

- Code de calcul aux éléments finis (TAFFETAS)
- Maillage : 4666 nœuds, 3676 éléments (voir figure 5)

  $\Delta x=\Delta y=0.69$ mm
- Pas de temps : $\Delta t = 1$ s
- Nombres adimensionnels (évalués au centre) : Peclet de grille : 0.86

  Courant : 0.43

  Fourier : 0.5
- Temps de calcul (PC, Pentium II, 166 MHz) : 20 min (pour une période de 240 s)

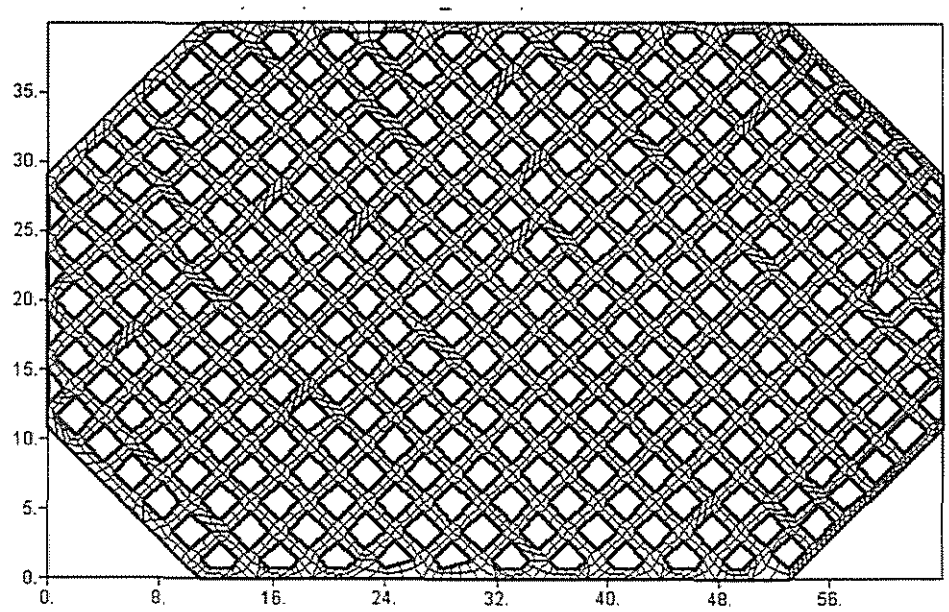


Figure 5 : Maillage du réseau de fractures

5.3 RÉSULTATS

Les BTC et la cartographie 2D des concentrations calculées à différents temps sont présentées en annexe 1.

Les isovaleurs ont été obtenues par interpolation linéaire des valeurs calculées par TAFFETAS aux 4666 nœuds du maillage (dans les fractures uniquement). C'est pourquoi les valeurs de concentration représentées aux points situés dans la matrice sont totalement artificielles et ne correspondent pas à des valeurs calculées.

Les résultats sont en accord avec les observations expérimentales. Ils diffèrent peu de ceux obtenus avec les deux premiers modèles testés. En particulier, la dispersion qui augmente avec la distance au point d'injection, est largement surestimée dans la seconde moitié du système (voir pentes des BTC expérimentales et numériques en x=54 mm).

A priori, rien ne s'oppose à ce que la technique de modélisation utilisée ici dans un cas simple soit appliquée à un réseau de fractures irrégulières (taille, orientation, propriétés hydrodynamiques...).

Avec un code de calcul robuste et des moyens de calculs suffisants, cette approche pourrait donc être testée pour modéliser les écoulements et le transport en galeries de mines.

6. Approche conceptuelle

En complément des modèles continus qui ont été présentés précédemment, on a choisi de développer une méthode discrète pour simuler le transport d'un traceur dans un micromodèle.

Celui-ci est représenté par un réseau orienté de tubes identiques (longueur L, diamètre D et section S). Les "pores et les nœuds" du système expérimental ne sont pas pris en compte dans le cadre de cette première étude.

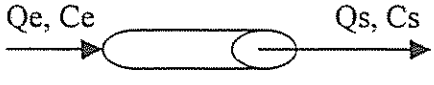
L'écoulement et le transport du traceur dans le système ainsi défini sont décrits de manière conceptuelle, peu spatialisée. En particulier, les débits et concentrations sont calculés uniquement aux nœuds (intersections des tubes).

Les deux modèles présentés dans ce chapitre ont été spécifiquement développés au BRGM à l'aide de la boîte à outil Simulink du logiciel Matlab.

6.1 PRÉSENTATION DU MODELE D'ÉCOULEMENT ET DE TRANSPORT

Deux modèles hydrodynamiques ont été envisagés. Ils sont tous les deux basés sur l'hypothèse d'écoulements de type Poiseuille dans les tubes et sur l'équation de conservation de la masse (somme des débits algébriques nulle) en chaque nœud. Comme nous le verrons plus loin, le modèle n°1 utilise une loi empirique de répartition des débits aux noeuds, alors que dans le second, le champ de pression est calculé pour estimer les débits.

La partie la plus conceptuelle du modèle réside dans la manière dont le transport est traité. Il s'agit d'une approche de type traitement du signal, où l'on considère que le transport du traceur dans un tube peut être représenté par un décalage temporel des fonctions de concentration à l'entrée et à la sortie (voir figure 6). Ce modèle systémique suppose que les tubes soient orientés, c'est-à-dire que le sens de l'écoulement soit connu.



$Q_s = Q_e$ (conservation)

$C_s(t) = C_e(t-\tau)$

Figure 6 : Principe du modèle de transport

Toute la difficulté consiste naturellement à évaluer le retard τ. Pour cela, on doit prendre en compte le transport advectif ainsi que la dispersion qui en résulte et qui s'ajoute à la diffusion moléculaire.

Ce mécanisme a été étudié pour la première fois par Taylor (1953) et porte donc son nom. On pourra trouver des informations complémentaires dans Aris (1955) et une description synthétique dans Rage (1996).

Le coefficient de dispersion de Taylor (D*) s'exprime comme la somme du coefficient de diffusion moléculaire D_{diff} et du coefficient de dispersion longitudinale.

Pour des nombres de Peclet élevés (>>1), D* est directement lié au nombre de Peclet :

$$D^* = D_{diff}.(1 + \frac{Pe^2}{210}) \qquad \text{avec} \quad Pe = \frac{U.D}{D_{diff}}.$$

En introduisant la dispersivité longitudinale α_L, et en négligeant, en accord avec Corapcioglu (1997) la diffusion moléculaire devant la dispersion hydrodynamique, il vient :

$$D^* = \alpha_L.U = D_{diff}.\frac{Pe^2}{210} \quad \Rightarrow \quad \alpha_L = \frac{U.D^2}{210.D_{diff}}$$

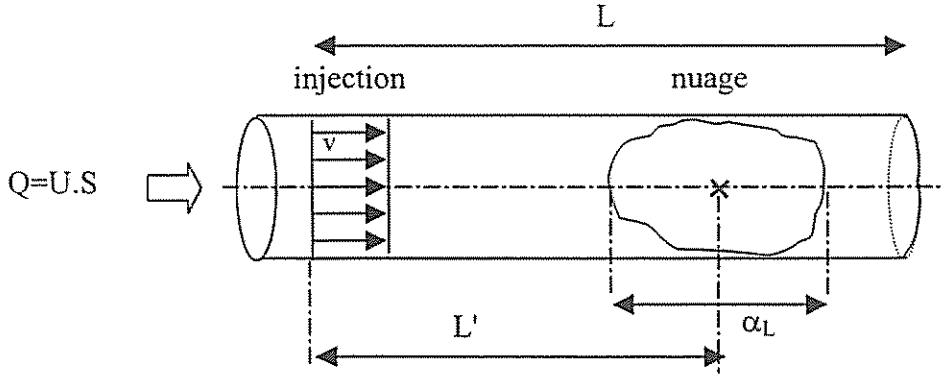


Figure 7 : Principe de la dispersion de Taylor

Notons qu'en réalité, pour un écoulement de Poiseuille, la vitesse horizontale n'est pas uniforme (elle est nulle aux parois et maximale sur l'axe). La vitesse de transport par advection peut être assimilée à la vitesse sur l'axe qui vaut 1.5.U (U est la vitesse débitante).

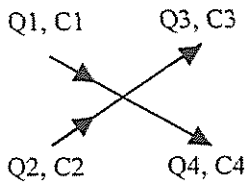
On définit τ comme le temps nécessaire à ce que le traceur apparaisse à la sortie du tube. Cela correspond à l'instant où le centre du nuage se trouve en $L'=L-\alpha_L/2$. La distance L' étant parcourue à la vitesse $v=3.U/2$, on a :

$$\tau = \frac{L'}{3U/2} = \frac{(L-\alpha_L/2)}{3U/2} = \frac{2}{3}.\frac{S}{Q}.(L - \frac{U.D^2/2}{210.D_{diff}})$$

donc :

$$\boxed{\tau = 2.S.(\frac{L}{3.Q} - \frac{1}{315.\pi.D_{diff}})}$$

Enfin, la conservation de la masse du traceur est traduite en chaque nœud par une loi de mélange parfait (rappel : le sens de l'écoulement est connu) :



$$C_3 = C_4 = \frac{C_1.Q_1 + C_2.Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

6.2 GÉOMÉTRIE DU RÉSEAU DE TUBES

On travaille avec un réseau homogène, dont tous les tubes ont les mêmes propriétés (longueur, diamètre). Le dimensionnement du réseau de tubes (voir figure 8) est présenté en annexe 2.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Géométrie externe du réseau : longueur 64 mm, largeur maximale 40 mm
- 311 nœuds, 600 tubes
- Longueur des tubes inclinés à 45°: 2.82 mm
- Longueur des 20 tubes horizontaux: 4 mm
- Section des tubes : 0.17536 mm^2 (diamètre=0.4725 mm)

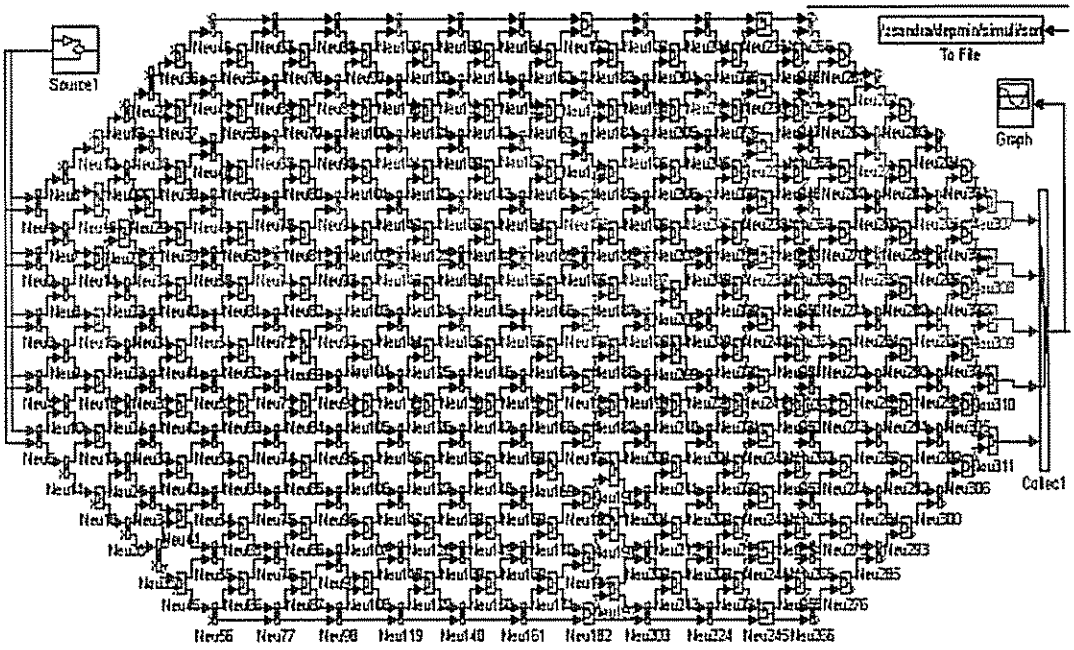


Figure 8 : Schéma du réseau de tubes

6.3 MODÈLE N°1 : RÉPARTITION EMPIRIQUE DES DÉBITS AUX NŒUDS

Dans cette version du modèle conceptuel, on ne calcule pas l'écoulement dans les tubes, mais on suppose qu'en chaque nœud, le débit se répartit proportionnellement aux sections des tubes avals.

En reprenant la numérotation du §6.1, cela s'écrit :

$$Q_3 = \frac{S_3}{S_3 + S_4}.(Q_1 + Q_2)$$

$$Q_4 = \frac{S_4}{S_3 + S_4}.(Q_1 + Q_2)$$

6.3.1 Paramètres physiques et hydrodynamiques

- **Porosité totale= 0.28** (i.e. densité surfacique de tubes)
- Régime hydrodynamique permanent :
  - $Q_{injecté} = 0.665924$ mm^3/s => **u = 0.3 mm/s** (dans le tube central)
  - Nombre adimensionnel (au centre avec d=0.4725 mm et $\nu = 1.10^{-6}$ m^2/s) :

    Re = u.d/ν = 0.1417

6.3.2 Paramètres numériques

- Conception, mise sous forme matricielle et résolution : logiciel Matlab/Simulink
- Méthode de résolution du système linéaire :Adams/Gear
- Pas de temps maximal : $\Delta t = 1$ s
- Temps de calcul (PC, Pentium II, 166 MHz) : quelques secondes (pour une période de simulation de 240 s)

6.3.3 Résultats

A partir des concentrations calculées en 46 nœuds répartis dans une moitié du réseau (en rose sur le schéma de la figure 8), et en utilisant la symétrie, on a interpolé les valeurs en tout point pour tracer les isoconcentrations dans le micromodèle à différents temps. La figure correspondante est présentée en annexe 1.

On constate que le modèle rend bien compte de la progression et de la dispersion, mais la forme des isocontours est très aplatie près des limites latérales.

Pour identifier la cause de ce comportement, nous avons tracé les lignes de courants calculées par ce modèle. En les comparant à celles obtenues dans les autres simulations (voir annexe 1), on s'aperçoit que le modèle ne prédit pas correctement les débits. Cette erreur se répercute naturellement sur le transport du traceur.

Un calcul simple permet d'expliquer le problème rencontré. En effet, considérons un petit réseau composé de 9 nœuds (voir figure 9). Tous les tubes sont identiques. On impose un débit constant Q aux nœuds 1 et 2 situés sur la face d'entrée.

Les tubes ayant tous la même section, selon le principe de répartition adopté dans le présent modèle conceptuel, le débit arrivant à un nœud se divise en parts égales dans les deux tubes avals. On a donc : $Q_{13}=Q_{14}=Q/2$ et $Q_{36}=Q_{37}=Q/4$.

Or, en explicitant la loi de Poiseuille supposée décrire l'écoulement dans chaque tube (cf. §1) : Qij=K.(Pi-Pj) avec $K=S^2/(8.\pi.\mu.L)$, et en appliquant une différence de pression entre les faces d'entrée et de sortie qui génère le débit Q aux nœuds 1 et 2, on peut montrer que :

$$P_3=(Pe+2.Ps)/3,\ P_4=(Pe+Ps)/2,\ P_5=(Pe+2.Ps)/3$$

$$Q_{13}=4.Q/7,\ Q_{14}=3.Q/7,\ Q_{36}=2.Q/7,\ Q_{37}=2.Q/7.$$

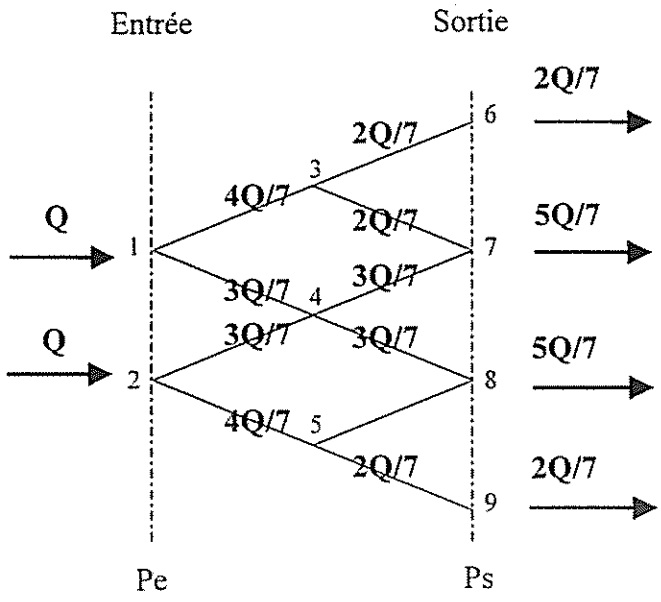


Figure 9 : Schéma d'un petit réseau divergent

Le modèle de répartition des débits sous-estime donc l'importance des écoulements près des limites latérales. En fait, il suppose implicitement que la résistance du fluide dans la partie avale n'influence pas l'écoulement en un point donné.

Cette lacune, qui apparaît en présence de convergent ou divergent (réseaux non rectangulaires) ou lorsque les tubes n'ont pas tous les mêmes propriétés géométriques, interdit l'application du modèle à un réseau complètement irrégulier.

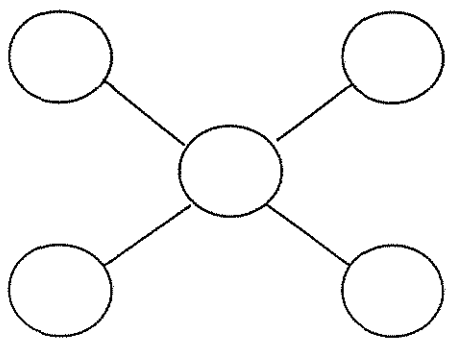
C'est pourquoi, le modèle a été par la suite profondément modifié afin de pouvoir calculer à la fois la répartition des pressions et celles des débits dans le réseau.

6.4 MODÈLE N°2 : CALCUL DU CHAMP DE PRESSION

Bien qu'il ne repose pas sur les mêmes équations que le précédent, le principe et la conception de ce second modèle en sont très proches. Ainsi, le dimensionnement du réseau est inchangé. Seul le contenu du motif de base et le nombre d'informations échangées entre chaque motif sont modifiés.

La pression en un nœud se trouve en combinant la loi de Kirchhoff (somme des débits nuls) et la loi de perte de charge.

Cette dernière est établie en supposant un écoulement de Poiseuille dans les tubes. On peut alors écrire une relation linéaire entre la perte de pression et le débit dans chaque tube. Le coefficient de proportionnalité est la conductance K (cf. §1.3.2).



K_{ki} : la conductance du tube reliant les nœuds k et i

P_i : la pression au nœud i

Q_{ki} : le débit dans le tube reliant les nœuds k et i

$$\forall\, k : Q_{ki} = K_{ki}.(P_k - Pi) \text{ et } \forall\, k : \sum_{i=1}^{4} Q_{ki} = 0 \quad \Rightarrow \quad P_k = \frac{\sum_{i=1}^{4} (K_{ki}.P_i)}{\sum_{i=1}^{4} K_{ki}}$$

Pour déterminer la pression en chaque nœud, il faut connaître la pression aux deux nœuds amonts mais également aux deux nœuds avals. Le système d'équations générées n'est donc pas explicite comme dans le cas précédent, ce qui peut entrainer des problèmes de convergence numérique.

On a donc pris soin de bien définir les conditions initiales du système, et de choisir des méthodes de résolution adaptées (pas variables) pour mettre en œuvre les simulations.

Le motif de base du réseau est constitué d'un nœud et des deux tubes avals (voir figure 10). Il reçoit en entrées la conductance, le débit et la concentration (de sortie) des deux tubes amonts ainsi que la pression calculée aux 4 nœuds voisins.

En sortie, il fournit la pression au nœud, et la conductance, le débit et la concentration en sortie des deux tubes avals.

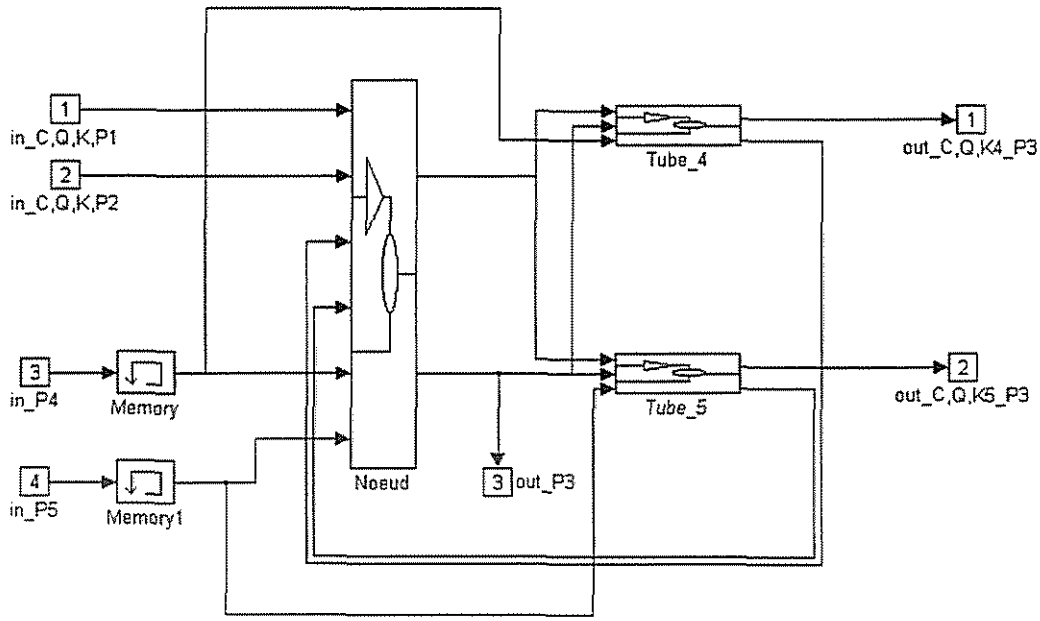


Figure 10 : Schéma d'ensemble d'un motif de base du réseau

Le module "nœud" contient un module pour calculer la concentration de mélange, et un autre pour calculer la pression.

6.4.1 Paramètres physiques et hydrodynamiques

- **Porosité totale= 0.28** (i.e. densité surfacique de tubes)
- Régime hydrodynamique permanent :
  - Conductance de chaque tube : $K=S^2/(8.\pi.\mu.L)$
  - $\Delta H=0.5$ mm => $Q=0.0541$ mm^3/s => **u = 0.3 mm/s** (dans les tubes centraux)
  - Nombre adimensionnel (au centre avec d=0.4725 mm et $\nu = 1.10^{-6}$ m^2/s) :

    $Re = u.d/\nu = 0.1457$

6.4.2 Paramètres numériques

- Conception, mise sous forme matricielle et résolution : logiciel Matlab/Simulink
- Méthode de résolution du système linéaire :Adams
- Pas de temps maximal : $\Delta t = 0.01$ s
- Temps de calcul (PC, Kayak 6, 350 MHz) : 20 minutes (simulation sur 240 s)

6.4.3 Résultats

A partir des concentrations calculées en 67 nœuds répartis dans une moitié du réseau, et en utilisant la symétrie, on a interpolé les valeurs en tout point pour tracer les isoconcentrations dans le micromodèle à différents temps. La figure correspondante est présentée en annexe 1.

Cette fois, le modèle donne une répartition correcte des débits, semblable par exemple à celles calculées par les modèles continus (voir figures en annexe 1).

Il indique une dispersion du traceur beaucoup moins importante que les autres, comme on peut le voir à la fois sur les isoconcentrations et sur les BTC (pentes très raide). De fait, les résultats numériques sont plus proches des résultats expérimentaux. Enfn, le modèle prévoit bien la propagation rapide du traceur le long des limites latérales supérieures et inférieures.

6.5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES SUR LE MODÈLE CONCEPTUEL DE RÉSEAU DE TUBES

Lorsque les écoulements sont décrits de manière appropriée (relation pression-débit), le transport d'un traceur dans le micromodèle expérimental semble pouvoir être prédit avec succès par la loi de conservation de la masse exprimée en chaque nœud d'un réseau de tubes. En effet, les résultats obtenus avec le second modèle conceptuel (voir annexe 1) révèlent une dispersion du soluté dans le réseau semblable à celle observée expérimentalement.

L'approche discrète qui a été développée, déterministe pour l'écoulement permanent et systémique pour le transport, possède les mêmes performances prédictives que les modèles plus classiques testés auparavant à l'aide du code de calculs hydrogéologique TAFFETAS.

De plus, sa conception permet de prendre en compte la géométrie exacte des tubes. Leur nombre dans le réseau n'est a priori limité que par le temps de calcul

Ces remarques laissent penser que cette technique de modélisation adoptée pour simuler le transport du traceur dans le micromodèle pourrait être appliquée pour prévoir le transport des solutés sulfatés dans les galeries minières.

Cependant, à l'échelle réelle, le modèle devra pouvoir rendre compte de certains phénomènes supplémentaires, qui étaient inexistants ou négligeables dans le cas académique étudié précédemment.

Pour les écoulements, il s'agit en particulier du fait que le réseau réel n'est pas orienté a priori. Il peut posséder plusieurs points d'entrée, voire une distribution non uniforme des entrées (infiltration de la pluviométrie à travers les couches calcaires supérieures). De plus, les écoulements ne sont pas permanents puisque les conditions limites varient au cours du temps.

D'autre part, en ce qui concerne le transport, il est fort probable que la distribution des concentrations aux nœuds ne soit pas parfaite comme il a été supposé. En effet, selon le rapport des sections des galeries et des débits arrivant aux intersections, le processus de mélange peut aller du mélange parfait au suivi des lignes de courant (Siemers & Dreybrodt, 1998).

A première vue, les modifications vont essentiellement consister à traiter le débit algébriquement dans toutes les équations et à introduire aux nœuds des lois de mélange conditionnelles en fonction du rapport des débits arrivant.

Le développement et la mise au point d'un modèle conceptuel qui puisse être appliqué au réseau de galeries minières constituent un des objectifs du programme de recherche pour l'année 2000. Dans ce contexte, les perspectives d'améliorations évoquées dans ce paragraphe seront naturellement explorées.

Conclusion

Plusieurs modèles d'écoulements et de transport ont été appliqués pour reproduire des résultats expérimentaux de dispersion d'un traceur dans un micromodèle.

Fondés sur des approches de modélisation différentes (description continue ou discrète du système, lois déterministes ou conceptuelles de conservation de la masse), ces modèles ont été développés avec des outils différents.

Ainsi, les modèles de milieu poreux équivalent, de milieu à double porosité et de réseau de fractures ont été mis en œuvre avec un code de calcul hydrogéologique aux éléments finis (TAFFETAS, développé au BRGM). Les deux versions du modèle conceptuel ont quant à elles été construites à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

On a imposé aux simulateurs la même porosité et le même régime d'écoulement (nombre de Reynolds) que dans le modèle expérimental. Ces contraintes, ajoutées aux critères de convergence classiques, ont permis de dimensionner les modèles.

Les résultats numériques obtenus avec les trois premiers modèles opérationnels sont quasiment identiques. Ils sont globalement satisfaisants, mais surestiment la largeur du front de dispersion par rapport aux observations expérimentales. Le second modèle conceptuel a quant à lui fournit des résultats encourageants avec une dispersion plus proche de celle observée expérimentalement.

Outre son aspect pédagogique, cette étude a permis de sélectionner les techniques de modélisation susceptibles d'être appliquées à une échelle bien plus grande pour prédire les écoulements et le transport de sulfate dans les réseaux de galeries des mines de fer ennoyées.

L'utilisation de modèles continus pour représenter des systèmes à grande échelle se heurte inexorablement au problème de la définition du volume représentatif et des propriétés macroscopiques (porosité, perméabilité et dispersivité). De plus, les temps de calculs peuvent être très importants, surtout dans le cas de milieu à double porosité.

En revanche, l'approche discrète du réseau de fractures ne présente pas a priori de contre-indications majeures. Il faut toutefois prévoir des moyens de calculs suffisants pour prendre en compte un maillage défini par un grand nombre de nœuds.

Enfin, sous réserve de quelques modifications destinées à améliorer sa pertinence par rapport au problème traité, le modèle conceptuel discret présenté dans ce rapport paraît également approprié.

Les modèles discrets semblent donc plus adaptés que les modèles continus pour simuler le transport dans les galeries minières du bassin ferrifère lorrain.

A court terme, la perspective de cette étude est le démarrage de la modélisation couplée chimie - transport dans les galeries de mines. A cet effet, il faudra définir de nouveaux tests à mettre en œuvre avec les méthodes sélectionnées dans la présente étude.

Bibliographie

Adams R. and Younger P.L. (1999) The application of Groundwater and Surface Water Modelling Systems to the Simulation of Groundwater Rebound in Abandoned Coalfields. Proceedings ModelCare99, Zürich, 20-23 sept. 1999, pp. 649-654.

Aris R. (1955) On the Dispersion of a Solute in a Fluid Flowing Through a Tube. Proc. Phys. Soc. Lond., Serie A, pp. 67-77.

Bauer S., Liedl R. and Sauter M. (1999) Modelling of karst development considering conduit-matrix exchange fow. Proceedings ModelCare99, Zürich, 20-23 sept. 1999, pp. 29-33.

Birk S., Liedl R. and Sauter M. (1999) Characterization of gypsum aquifers using a coupled continuum-pipe flow model. Proceedings ModelCare99, Zürich, 20-23 sept. 1999, pp. 95-100.

Corapcioglu M.Y., Chowdhurry S. and Roosevelt E. (1997) Micromodel Visualization and Quantification of Solute Transport in Porous Media. Water Resources Research, Vol. 33, n°11, pp. 2547-2558.

Fillion E., Noyer M.L., Sauty J.P. and Siegel P. (1997) Manuel d'Utilisation de TAFFETAS. Rapport BRGM R38621 DR/HGT 95.

Gylling B., Moreno L. and Neretnieks I. (1999) The Channel Network Model - A Tool for Transport Simulations in Fractured Media. GroundWater, Vol. 37, n°3, pp. 367-375.

Long J.C.S., Remer J.S., Wilson C.R. and Witherspoon (1982) Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures. Water Resources Research, Vol. 18, n°3, pp. 645-658.

Moreno L. and Neretnieks I. (1993) Fluid Flow and Solute Transport in a Network of Channels. J. of Contaminant Hydrology, Vol. 14, pp. 163-192.

Morshed J. and Kaluarachchi J.J. (1998) Application of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm in Flow and Transport Simulations. Advances in Water Resources, Vol. 22, n°2, pp. 145-158.

Schwartz F.W., Smith L. and Crowe A.S. (1983) A stochastic Analysis of Macroscopic Dispersion in Fractured Media. Water Resources Research, n°19, pp. 1253-1265.

Siemers J. and Dreybrodt W. (1998) Early development of karst aquifers on percolation networks of fractures in limestone. Water Resources Research, Vol. 34, n°3, pp. 409-419.

Taylor G. (1953) Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly Through a Tube: Proc. Physical Society London, Serie A, Vol.219, pp.186-203.

Warren J.E. and Root P.J. (1963) The Behaviour of naturally Fractured Reservoirs. Soc. Pet. Eng., 3(2), pp. 245-255.

Sur le WEB :

Rage T. (1996) Studies of Tracer Dispersion and Fluid Flow in Porous Media. Thèse de l'Université d'Oslo, Chapitre 3.3 Disperion Mechanism.

http://www.uio.no/~trage/thesis/thesis/node12.html

Sellens R. (1996) Losses in Piping. Course of Queen's University at Kingston, Mechanical Engineering.

http://sellensr.me.queensu.ca/sellens/451/losses.htm

Stockman H.W., Cooper C., Li C. and Perea-Reeves S.J. (1997 ?) Practical Application of Lattice-Gas and Lattice Boltzmann Methods to Dispersion Problems

http://www.sandia.gov/eesector/gs/gc/hws/saltfing.htm

Annexes

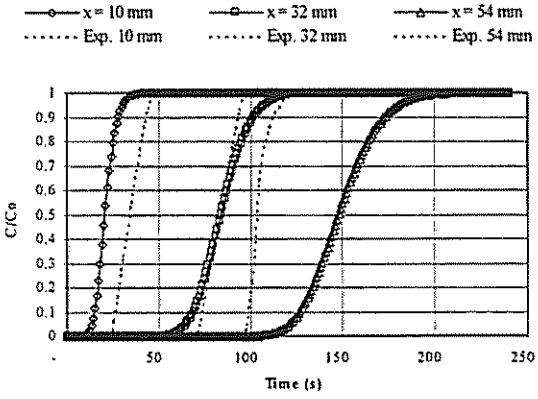
Annexe 1 :

Résultats numériques

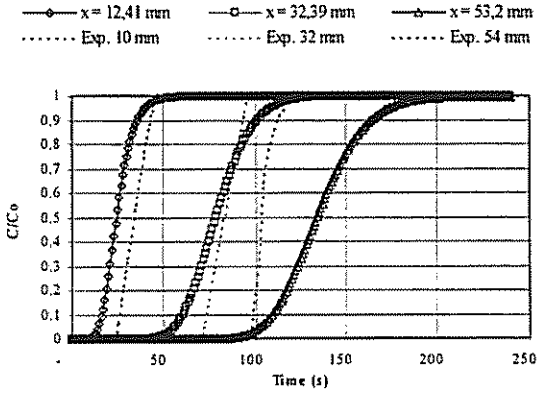
Courbes de passage du traceur (BTC) en trois points.

Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

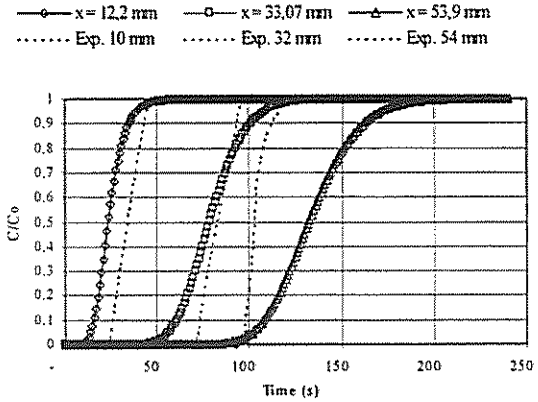
Milieu poreux équivalent



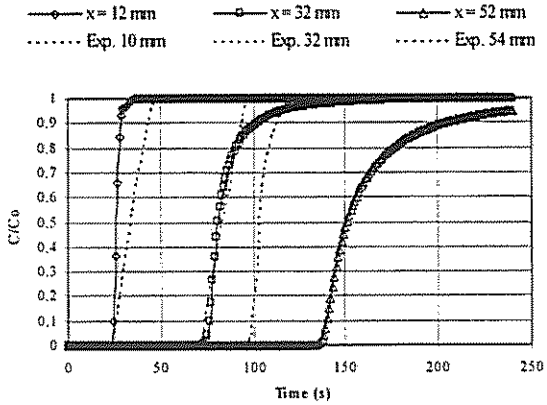
Milieu à double porosité



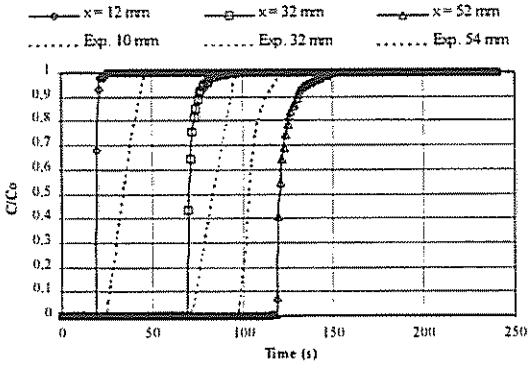
Réseau de fractures



Modèle conceptuel n°1



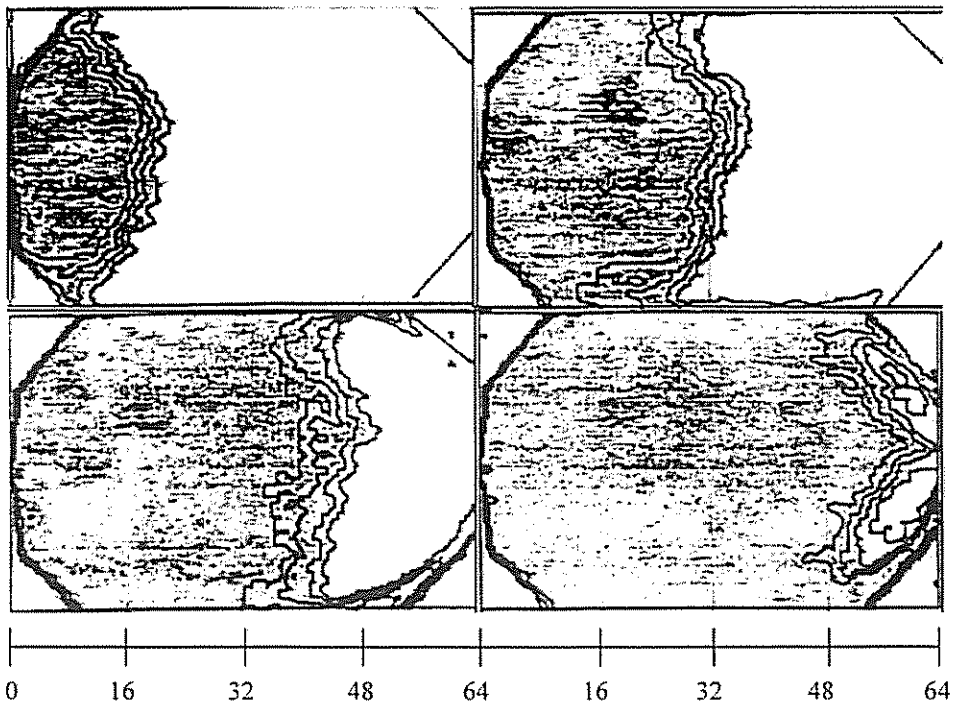
Modèle conceptuel n°2



Evolution temporelle de la distribution de la concentration du traceur dans le micromodèle.

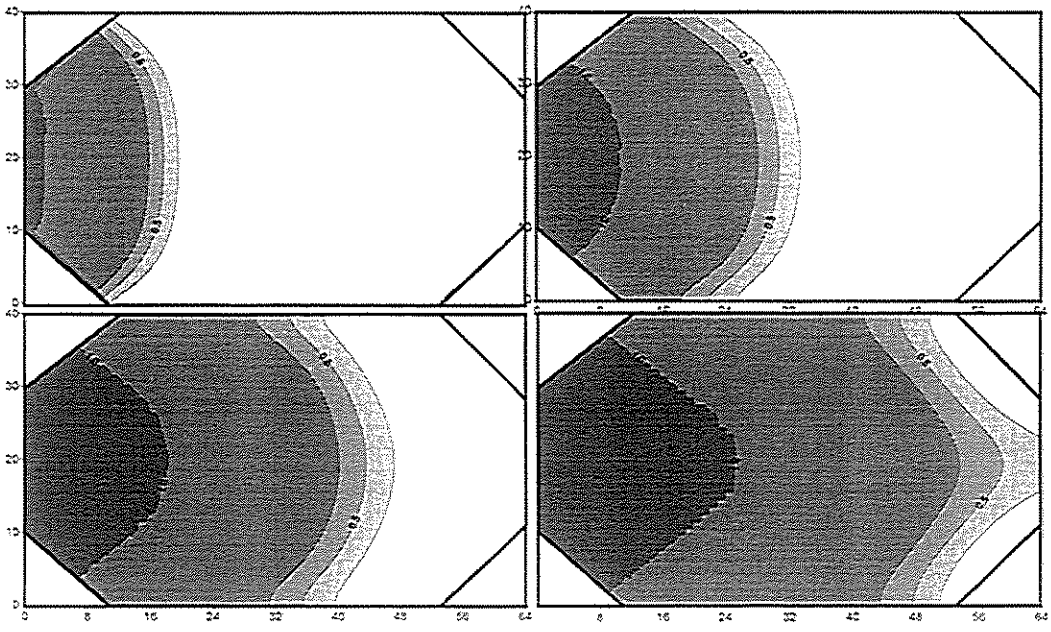
Résultats expérimentaux à t=38s, t=81s, t=122s, t=163s

D'après Corapcioglu et al. (1997)

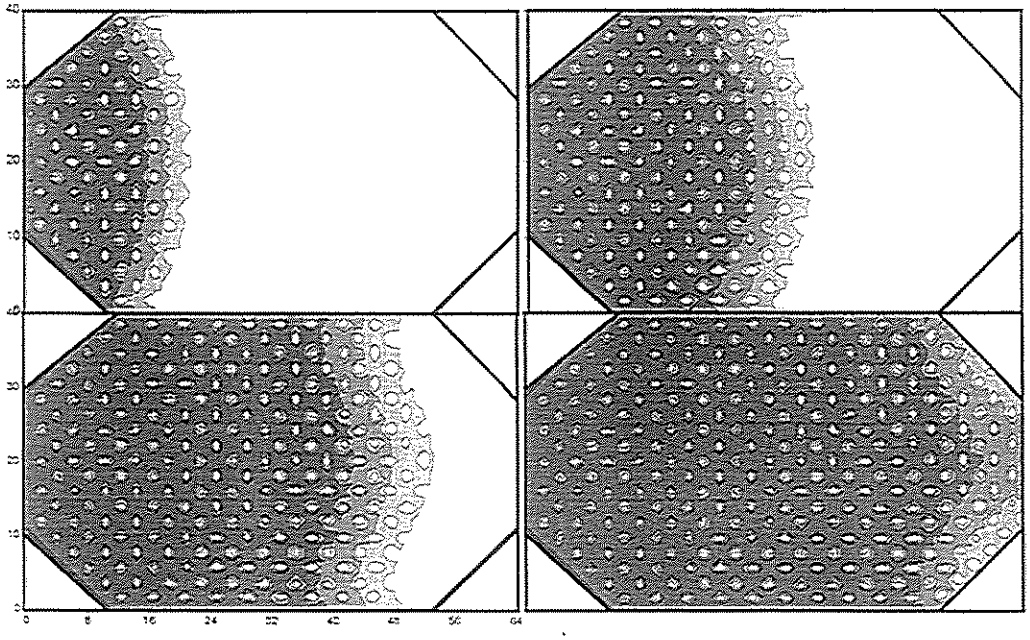


Représentation 2D des isovaleurs calculées à t=40s, t=80s, t=120s et t=160 s

Milieu Poreux Equivalent

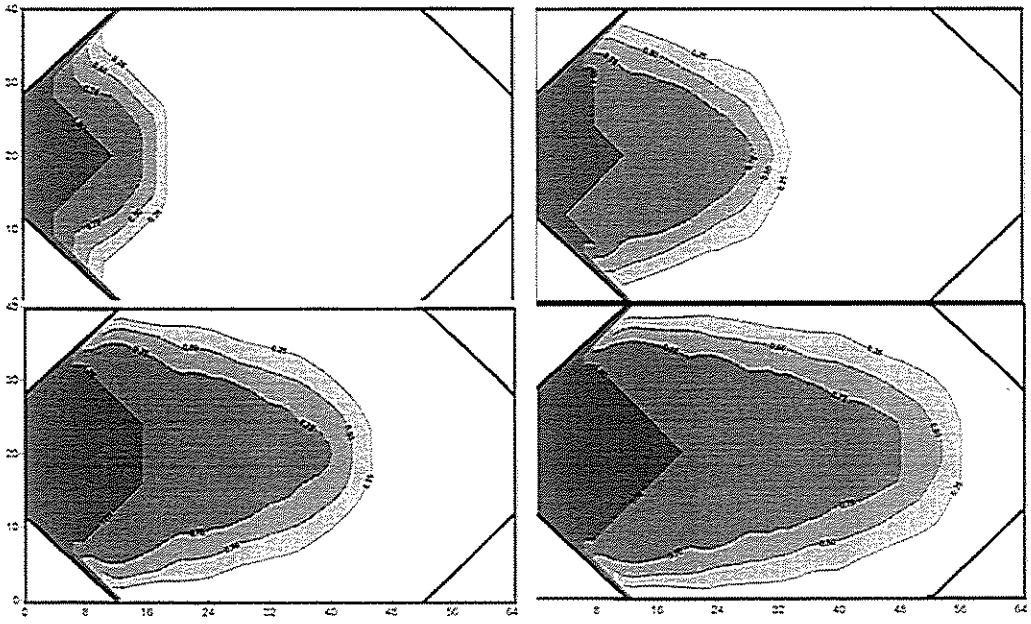


Milieu à double porosité

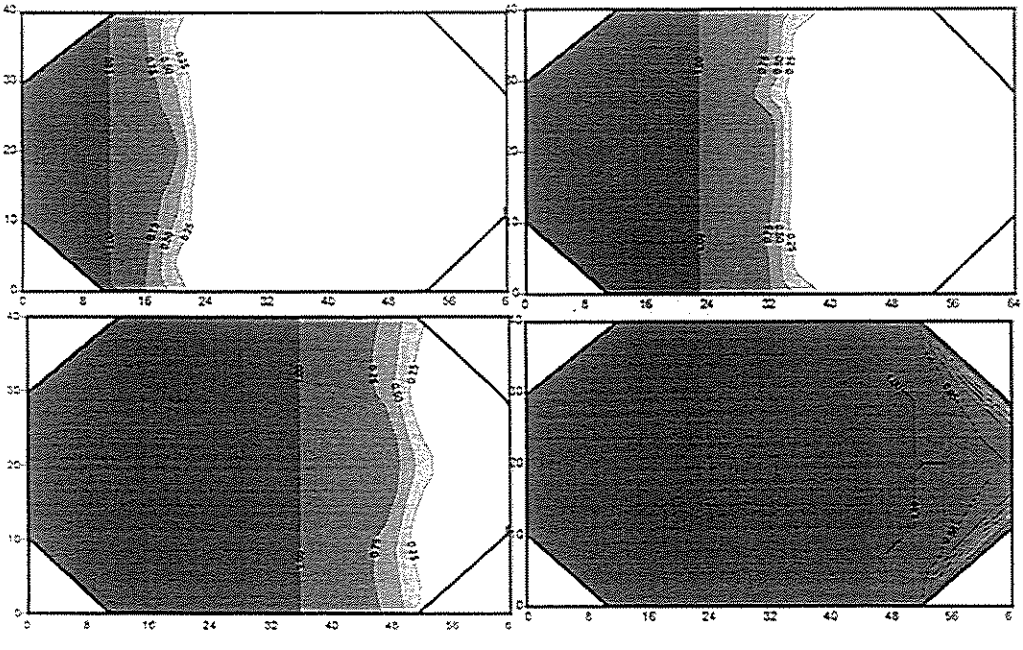


Modèles conceptuels

1) Réseau de 311 tubes (répartition empirique des débits aux noeuds)

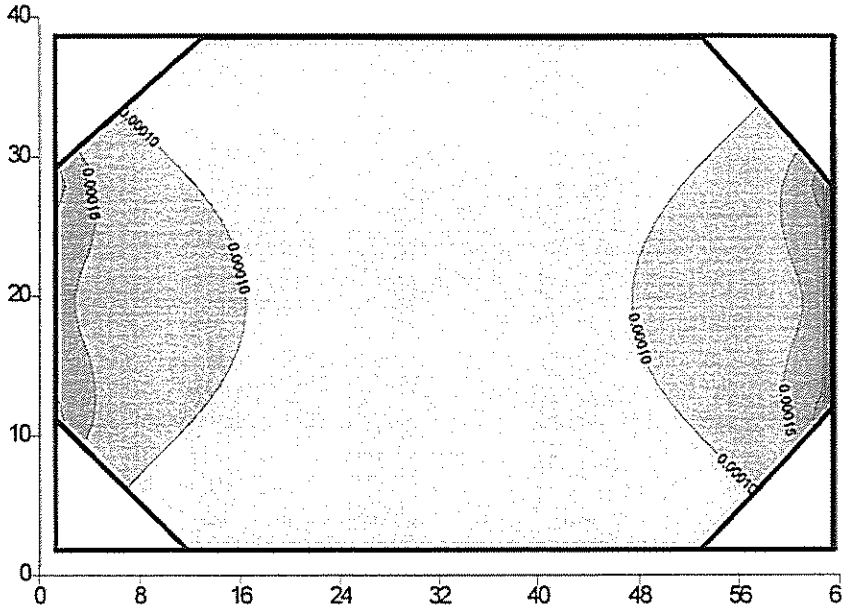


2) Réseau de 311 tubes (calcul du champ de pression et des débits)

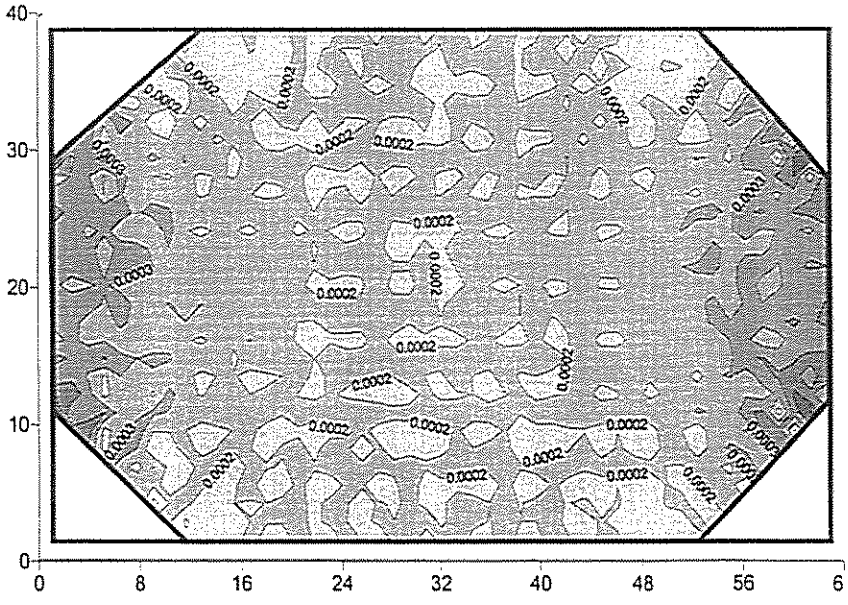


Comparaison des distributions de débits dans le micromodèle obtenues avec les différentes techniques de modélisation

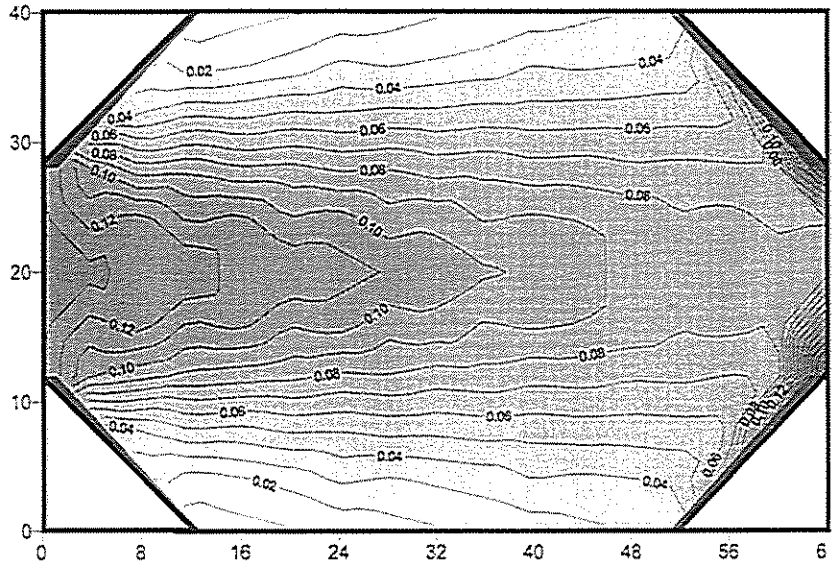
Milieu Poreux Equivalent (U en m/s)



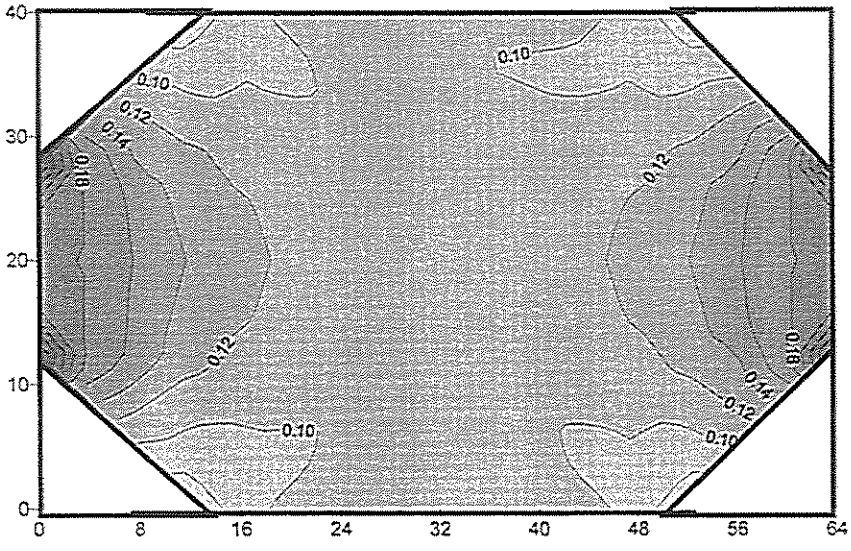
Milieu fracturé



Modèle conceptuel n°1 (débits aux nœuds, en m3/s)



Modèle conceptuel n°2 (débits aux nœuds, en m3/s)

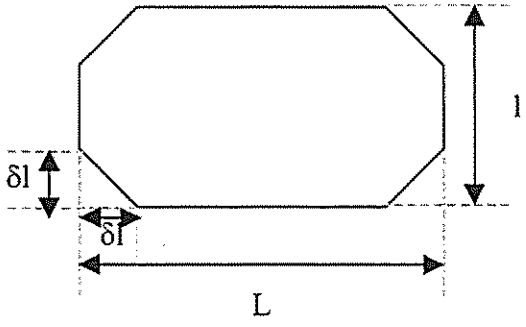


Annexe 2 :

Dimensionnement du réseau conceptuel

On cherche les caractéristiques géométriques du réseau de tubes et de nœuds qui soit équivalent (similitude des échelles spatiales) au micromodèle expérimental décrit dans l'article de Corapcioglu et al. (1997).

Dimensions du micromodèle :



L = 64 mm

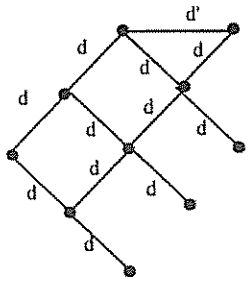
L = 40 mm

δl = 11 mm

δl/L = 0.171875

δl/l = 0.275

Dimensions des canaux :



α = 45°

d = 0.7 mm

d' = 2d.cosα = 1 mm

Un premier calcul a montré que le réseau théorique vérifiant une parfaite homothétie dimensionnelle par rapport au micromodèle expérimental devait comporter le même nombre de tubes que le micromodèle comporte de liaisons, ce qui représentait 4741 nœuds (indépendant du rapport d'homothétie).

Ce réseau étant trop volumineux, on a choisi de le remplacer par un modèle plus petit (en regroupant les tubes 4 par 4), mais pas tout à fait homothétique (voir figure).

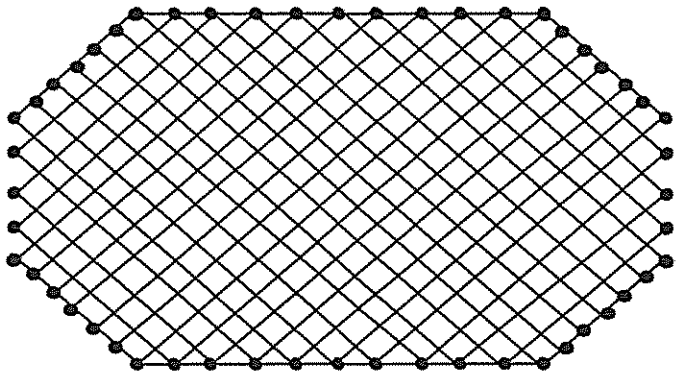


Schéma du modèle conceptuel

On appelle d_{mod} la longueur d'un tube incliné à 45°. Pour que $l=20* d_{mod} \cos45=40$ mm et $L=32* d_{mod} \cos45=64$ mm, il faut que $d_{mod} = 2.82$ mm et $d'_{mod} = d_{mod}*\cos45 = 4$ mm.

Le micromodèle expérimental n'est pas composé uniquement de tubes (mais de canaux, de pores et de nœuds). On ne peut donc pas simplement appliquer la réduction de rapport λ pour déterminer le diamètre (D) des tubes du réseau modélisé.

On utilise donc le critère d'égalité des porosités expérimentale et modélisée.

$Vtubes = (580*dmod+20*d'mod)*Stubes$

$= (580*2.82.10^{-3}+20*4.10^{-3})*\pi*D^2/4$

$= 1.347429.D^2$

$Vtotal = (L_{mod}*l_{mod}-2*\delta l^2_{mod}).D$

$= (\lambda 64.10^{-3}*40.10^{-3}-2*11.96.10^{-3}).D$

$= 0.00227391 .D$

$\varepsilon_{mod} = Vtubes/Vtotal = 592.5586.D$

$\varepsilon_{mod} = e = 0.28 \quad \Leftrightarrow \quad$ **D = 0.4725 mm** et **S_{tubes}=0.17536 mm^2**

Remarques :

- ε_{mod} n'est pas à proprement parler une porosité, mais plutôt d'une densité surfacique de tubes.
- L'épaisseur (hauteur) du réseau est égale au diamètre des tubes.
- La tortuosité du réseau (distance réelle parcourue par une particule pour aller d'un point à un autre, rapportée à la distance en ligne droite séparant ces deux points) est de 1/cos45=1.41.
- Pour traverser le modèle théorique, une particule traverse au minimum 32 tubes de longueur 2.82 mm (soit 90.24 mm), contre 128 liaisons de longueur moyenne 0.7 mm (soit 89.6 mm) dans le micromodèle expérimental (d'après la topologie). Le rapport d'échelle est quasiment unitaire.

  Puisque les paramètres de simulation sont telles que les vitesses sont identiques dans les deux modèles, on a bien la même échelle temporelle dans les deux cas.

Annexe 3 :

Estimation du régime d'écoulement dans un réseau de galeries d'exploitation minière

On présente dans ce chapitre les calculs élémentaires qui permettent de déterminer le régime d'écoulement moyen dans les galeries de mines de fer Lorraines.

L'objectif de cette étude est de s'assurer que les techniques de modélisation basées sur l'hypothèse d'écoulement laminaire (de type Poiseuille) pourraient, sans contradiction hydrodynamique, être appliquées à ce système réel.

Les caractéristiques géométriques principales d'un bassin d'exploitation et de son réseau de galeries ont été estimées à partir des plans fournis par l'exploitant.

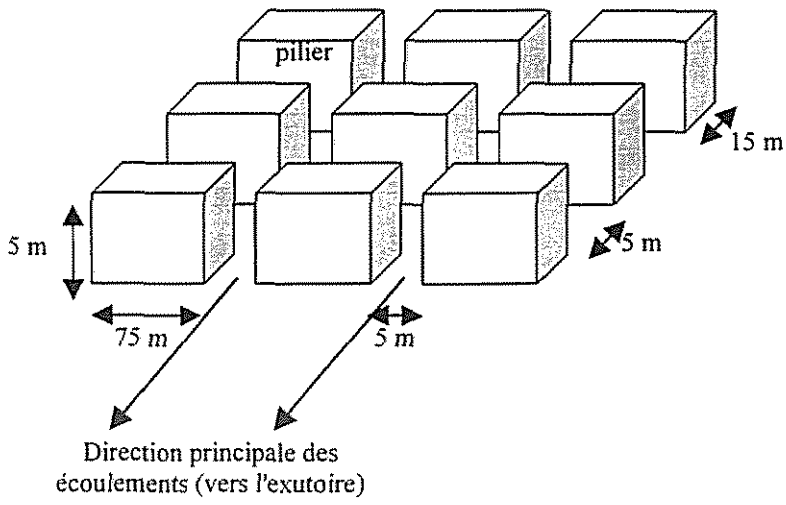
Topologie du réseau de galeries (1 couche) :

Hauteur des galeries :

$H = 5$ m

Base des piliers :

$75*15$ m^2



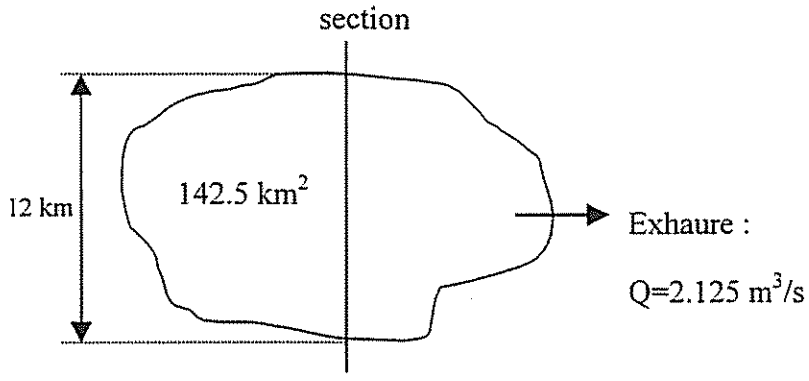
Section de passage du fluide dans la direction principale de l'écoulement :

$S = 5*5$ m^2

Longueur des galeries dans la direction principale de l'écoulement :

$L = 15$ m

Géométrie du bassin d'exploitation (3 couches) :



Bassin férrifère sud en Lorraine (d'après rapport BURGEAP/R.290/7-78)

Section d'une couche :

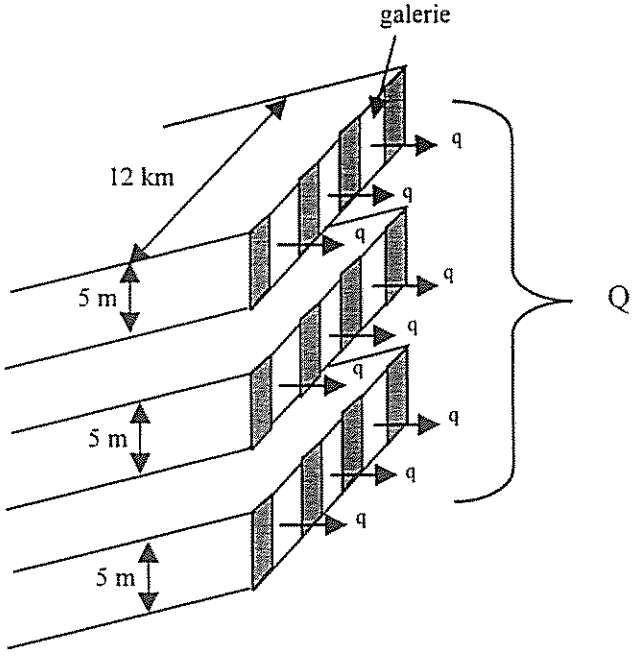
$Sc = 12000*5$

$Sc = 60000\ m^2$

Section de passage du fluide dans une couche :

$$\Sigma = (\frac{5}{(75+5)}*12000)*5$$

$\Sigma = 3750\ m^2$



Le débit observé à l'exhaure traverse la section suivante :

$S'=3*\Sigma$

$S' = 11250\ m^2$

Régime d'écoulement

La vitesse moyenne du fluide dans les galeries est donc :

$U = Q / S' = 2.125 / 11250$ => $U = 1.88.10^{-4}$ m/s => **$U \approx 0.2$ mm/s**

Il en résulte un débit moyen par galerie :

$q = U.S = 0.2.10^{-3}*25$ => $q = 0.005$ m^3/s => **$q = 5$ l/s**

Le nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement dans une galerie est $Re = \frac{U.d}{\upsilon}$, avec ν : la viscosité cinématique de l'eau (en m^2/s) et d : le diamètre équivalent des galeries.

$Re = 0.2.10^{-3}*5/1.10^{-6}$ => **$Re = 1000$**

Re>>1

=> on n'est pas dans le cas d'un écoulement de Stokes (rampant). L'utilisation de la loi de Darcy pour une description macroscopique de l'écoulement n'est a priori pas appropriée.

Re<2500

=> l'écoulement est **laminaire**.

BRGM
Service Reprographie
Impression et façonnage

BRGM/Service Eau
3, avenue Claude Guillemin
B.P. 6009
45060 ORLEANS Cedex 2